УДК 62-83-523

ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов

Томский политехнический университет
E-mail: odivan@yandex.ru

Рассмотрены принципы построения трехфазного частотно-регулируемого асинхронного двигателя, позволяющего при отказе одной из трех фаз обеспечить работу в двухфазном режиме с сохранением кругового вращающегося поля за счет активизации алгоритма восстановления в управляющем микроконтроллере. Приведены результаты моделирования для аварийной ситуации типа: «обрыв фазы». Проведен сравнительный анализ функционирования асинхронного двигателя в трех- и двухфазных режимах работы и определены ограничения по применению аварийного двухфазного режима работы с алгоритмом восстановления работоспособности.

Существуют области применения асинхронных частотно-регулируемых двигателей (АД), для которых прекращение функционирования может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования с риском для персонала, большим экономическим потерям при авариях на необслуживаемых объектах эксплуатации с безостановочным циклом работы в течение продолжительного времени, браку продукции при продолжительном цикле обработки деталей. Для таких областей применения АД задача повышения живучести становится определяющей.

Известны системы электропривода на основе АД с алгоритмическим восстановлением работоспособности, которые применимы для 5- или 7-фазных АД [1]. При аварии типа «обрыв фазы» и соответствующем управлении обеспечивают восстановление кругового вращающегося поля. В трехфазном АД [2] при аварии типа «обрыв фазы» живучесть повышается за счет алгоритма введения гармоник напряжения для нейтрализации второй и высших гармоник пульсаций момента и сдвига частот в более высокий диапазон спектра, что позволяет компенсировать пульсации момента за счет момента инерции АД.

Предложен новый подход в повышении живучести за счет микроконтроллерного управления асинхронным электроприводом с реализацией алгоритма восстановления работоспособности в аварийной ситуации (в двухфазном режиме) [3]. Известны условия существования кругового вращающегося магнитного поля в двухфазном режиме трехфазной электрической машины с двумя произвольно сдвинутыми в пространстве обмотками: $\delta+\beta=\pi$; $F_{BM}=F_{CM}$, где F_{BM}, F_{CM} – амплитудные значения магнитодвижущих сил, отказ в фазе “A”, δ – угол пространственного сдвига обмоток, $\delta=2\pi/3$, β – угол временного сдвига токов обмоток, $\beta=\pi/3$. При наличии регуляторов тока в системе управления АД: $F_{BM}=F_{CM}$.

Из имеющихся технических предпосылок построения системы электропривода и применения методов мехатроники можно рассматривать возможность повышения живучести в случае аварийного отключения одной из фаз трехфазного АД с позиций повышения надежности системы с ненагруженным резервом [4]. Определяющим параметром применения нового подхода повышения живучести является время переключения структуры $T_П$ АД при возникновении аварийной ситуации, определяющее неуправляемую стадию процесса переключения структуры электропривода.

Для решения задачи повышения живучести функционирования АД при аварийной ситуации необходимо: реализовать силовой преобразователь (СП) по схеме с развязанными фазами, АД выполняется по принципу подчиненного регулирования (в минимальном составе это моментный двигатель с обратной связью по току). АД должен иметь в СП блок диагностики двигателя и преобразовательных ячеек. Опрос выявления отказов в функционировании производится с частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с использованием датчиков состояния преобразовательных ячеек [5], которые вырабатывают 3 бита отказа (ячейки СП или фазной обмотки двигателя). Управление АД строится на основе управляющего микроконтроллера с программным заданием фазных токов с частотой ШИМ и поддержкой алгоритма восстановления в аварийном двухфазном режиме. Вариант реализации асинхронного электропривода с повышенной живучестью приведен на рис. 1.

Для проверки предложенного способа повышения живучести АД была разработана математическая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода, рис. 1. Математическая модель позволяет исследовать электропривод в несимметричных и аварийных режимах работы.

Математическая модель трехфазного АД рассматривается со следующими допущениями: магнитная цепь принимается ненасыщенной; энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре; потери в стали и механические потери пренебрежимо малы; воздушный зазор равномерен; напряжения фаз синусоидальны; питающая сеть – бесконечно большой мощности. Допущения в преобразователе частоты: падение напряжения в преобразовательных ячейках нулевое, задержки переключения отсутствуют.

При моделировании АД в естественной трехфазной системе координат взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора являются переменными, изменяющиеся по гармоническому закону при вращении ротора машины. Для упро-

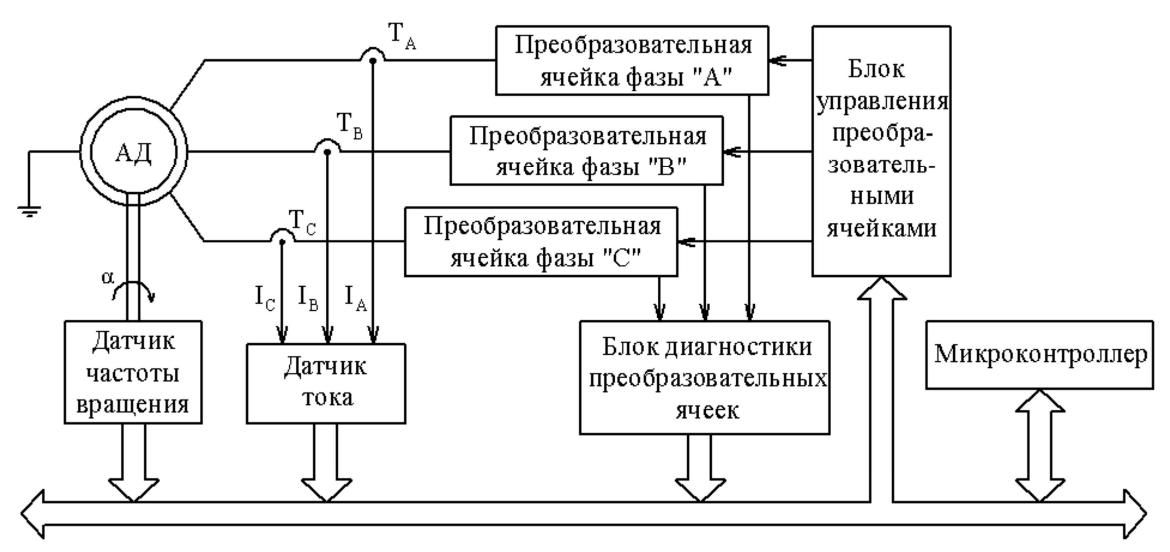


Рис. 1. *Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода с повышенной живучестью*

щения математической модели, необходимо перейти к заторможенной системе координат, чтобы избавится от переменных индуктивностей. Модель трехфазной машины в заторможенной системе координат (α,β,γ) представлена на рис. 2.

Система дифференциальных уравнений, описывающая АД в трехфазной заторможенной системе координат [6]:

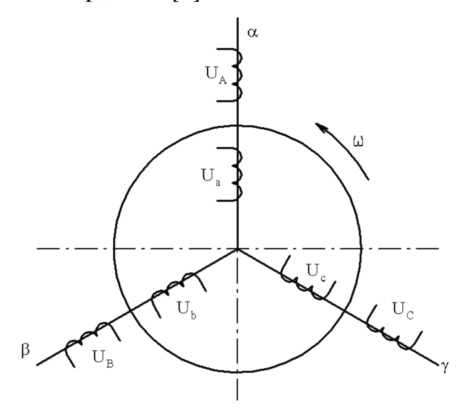


Рис. 2. *Пространственная модель АД в трехфазной заторможенной системе координат*

$$
\begin{aligned}
U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt},\\
U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt},\\
U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt},\\
0 &= R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3},\\
0 &= R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3},\\
0 &= R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3},
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где R_s, R_r – сопротивления фазы статора и ротора соответственно, U_A, U_B, U_C – фазные питающие напряжения, i_A, i_B, i_C – токи в фазах статора, i_a, i_b, i_c – токи в фазах ротора, ω – частота вращения вала АД, Ψ_A – потокосцепление фазы, которое содержит взаимные индуктивности между обмоткой фазы "A" статора и всеми остальными обмотками:

$$\Psi_A = L_S i_A - \frac{1}{2}L_m i_B - \frac{1}{2}L_m i_C + L_m i_a - \frac{1}{2}L_m i_b - \frac{1}{2}L_m i_c\ ,$$

где L_s – индуктивность фазы, L_m – взаимная индуктивность. Потокосцепления Ψ_B, Ψ_C, Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c записываются аналогично. Подставляя записанные потокосцепления в (1), получим систему из 6 уравнений и 6 неизвестных: i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c. Для решения полученной системы необходимо перейти к матричной форме записи уравнений. Матричное уравнение в нормальной форме Коши будет выглядеть (Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c в правой части уравнения не подставлены для укорочения записи):

$$
\begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \\ \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\
-L_m/2 & L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\
-L_m/2 & -L_m/2 & L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\
L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 & -L_m/2 \\
-L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 \\
-L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R
\end{bmatrix}^{-1} \times
$$

$$
\times \begin{bmatrix}
U_A - R_s \cdot i_A \\
U_B - R_s \cdot i_B \\
U_C - R_s \cdot i_C \\
-R_r \cdot i_a - (\Psi_b - \Psi_c)\omega/\sqrt{3} \\
-R_r \cdot i_b - (\Psi_c - \Psi_a)\omega/\sqrt{3} \\
-R_r \cdot i_c - (\Psi_a - \Psi_b)\omega/\sqrt{3}
\end{bmatrix}. \qquad (2)
$$

Решением системы (2) являются токи во всех фазах статора и ротора. Расчет электромагнитного момента для трехфазной системы координат содержит все возможные пары произведений токов двигателя [4]:

$$M = p\frac{\sqrt{3}}{2}L_m[(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)].$$

Частоту вращения вала АД найдем интегрированием уравнения движения электропривода, разрешенное относительно производной по скорости:

$$\frac{d\omega}{dt} = (M - M_c)\cdot\frac{p}{J_\Sigma},$$

где J_Σ – суммарный момент инерции вращающихся масс, приведенных к валу двигателя; p – число пар полюсов; M_c – момент сопротивления.

Система управления содержала контур тока в каждой фазе для поддержания равенства магнитодвижущих сил в аварийном двухфазном режиме. Контур скорости отсутствовал.

Уравнение обратной связи для фазы двигателя:

$$U = (I_З - I_{OC})\cdot k\frac{1+Tp}{Tp},$$

где $I_З$ – ток задания определяется следующими уравнениями для каждой фазы:

$I_A = I_m\cdot\sin(\omega t)$, $I_B = I_m\cdot\sin(\omega t + 4\pi/3)$, $I_C = I_m\cdot\sin(\omega t + 2\pi/3)$, (3)

где I_m – амплитуда заданного тока, I_{OC} – ток обратной связи, $k\frac{1+Tp}{Tp}$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора, k – коэффициент передачи регулятора, p – оператор Лапласа, T – постоянная времени регулятора, U – фазное напряжение, подаваемое на двигатель.

Переход в аварийный двухфазный режим при аварийной ситуации типа «обрыв фазы» осуществляется расчетом АД, представленного системой дифференциальных уравнений (1), не содержащей соответствующего уравнения (отказавшей фазы). Для случая обрыва фазы “А” в системе (1) будет отсутствовать первое уравнение Кирхгофа. Соответственно ток в этой фазе будет равным нулю.

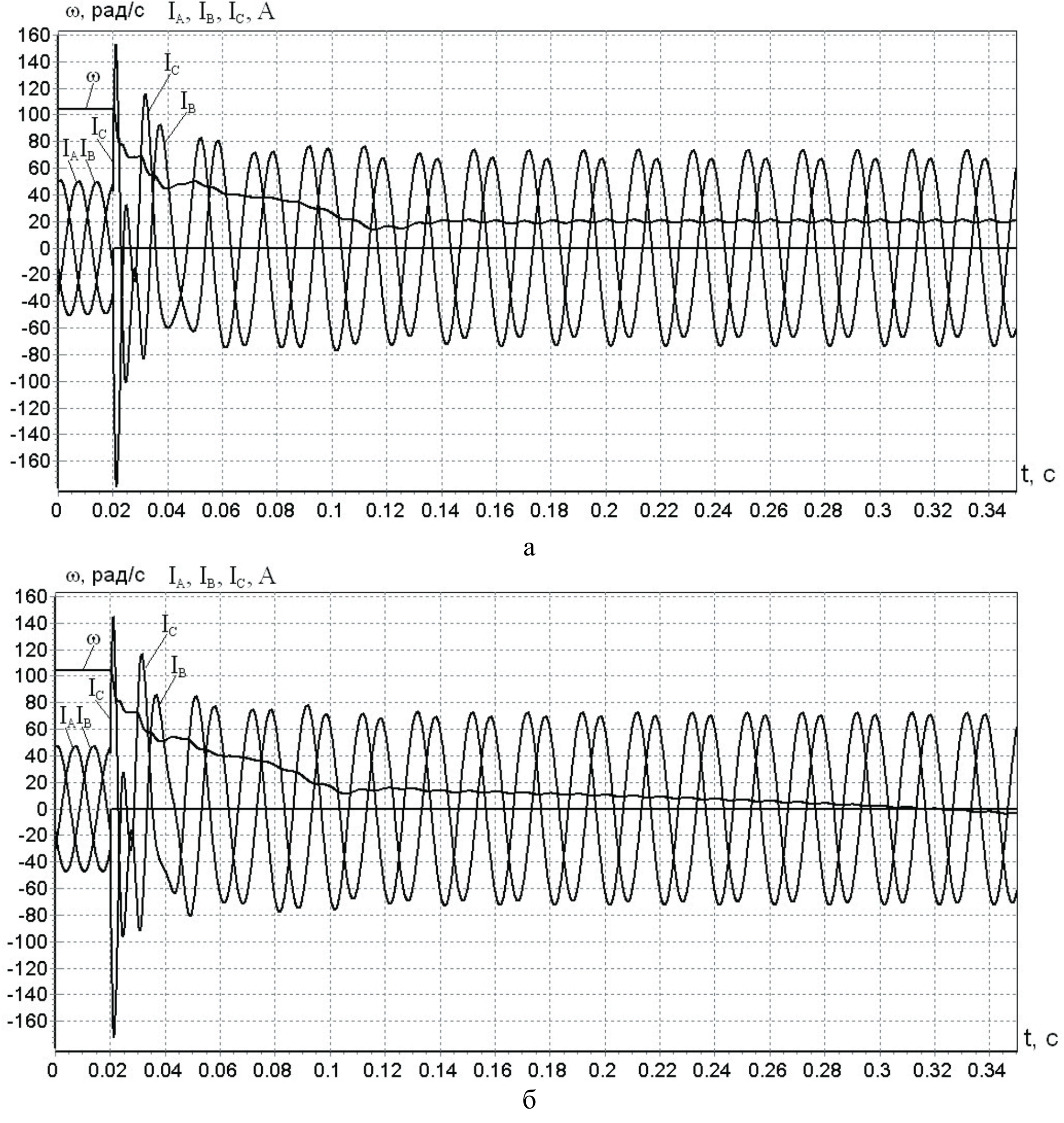


Рис. 3. *Временные диаграммы переходного процесса аварийного режима АД при: а) нулевой и б) номинальной нагрузке*

При работе алгоритма восстановления происходит изменение токов задания в электроприводе. В двухфазном аварийном режиме при обрыве фазы "А" с активизированным алгоритмом восстановления токи задания в двух оставшихся фазах в отличие от (3) имеют фазовый сдвиг $\pi/3$ и изменена очередность их формирования, опережающей становится фаза "С" (углы φ отрицательные):

$$I_B=I_m\cdot\sin(\omega t-\pi),\ I_C=I_m\cdot\sin(\omega t-2\pi/3).$$

Решение системы уравнений реализовано в программной среде Delphi 6. Система дифференциальных уравнений решена численным методом Рунге-Кутта 4-го порядка. Для моделирования был выбран двигатель MTF 311-6.

На рис. 3–5 приведены результаты моделирования переходных процессов трехфазного АД при переключении в аварийный двухфазный режим.

На рис. 3, *а*, *б*, приведены графики переходного процесса частоты вращения и фазных токов АД при переключении из трехфазного в аварийный двухфазный режим работы. Рис. 3, *а*, – нулевая; рис. 3, *б*, – номинальная нагрузка на валу. В аварийном двухфазном режиме при нулевой нагрузке частота вращения составляет 19 % относительно трехфазного режима, а при номинальной нагрузке наблюдается падение частоты вращения до нуля с последующим опрокидыванием АД за время 0,3 с.

На рис. 4, *а*, *б*, приведены графики переходного процесса частоты вращения и фазных токов АД при переключении из трехфазного в аварийный двухфазный режим с активизированным алгоритмом восстановления. Рис. 4, *а*, – нулевая; рис. 4, *б*, – номинальная нагрузка на валу. В аварийном двухфазном режиме при нулевой нагрузке верхний предел частоты вращения составляет 50 % относи-

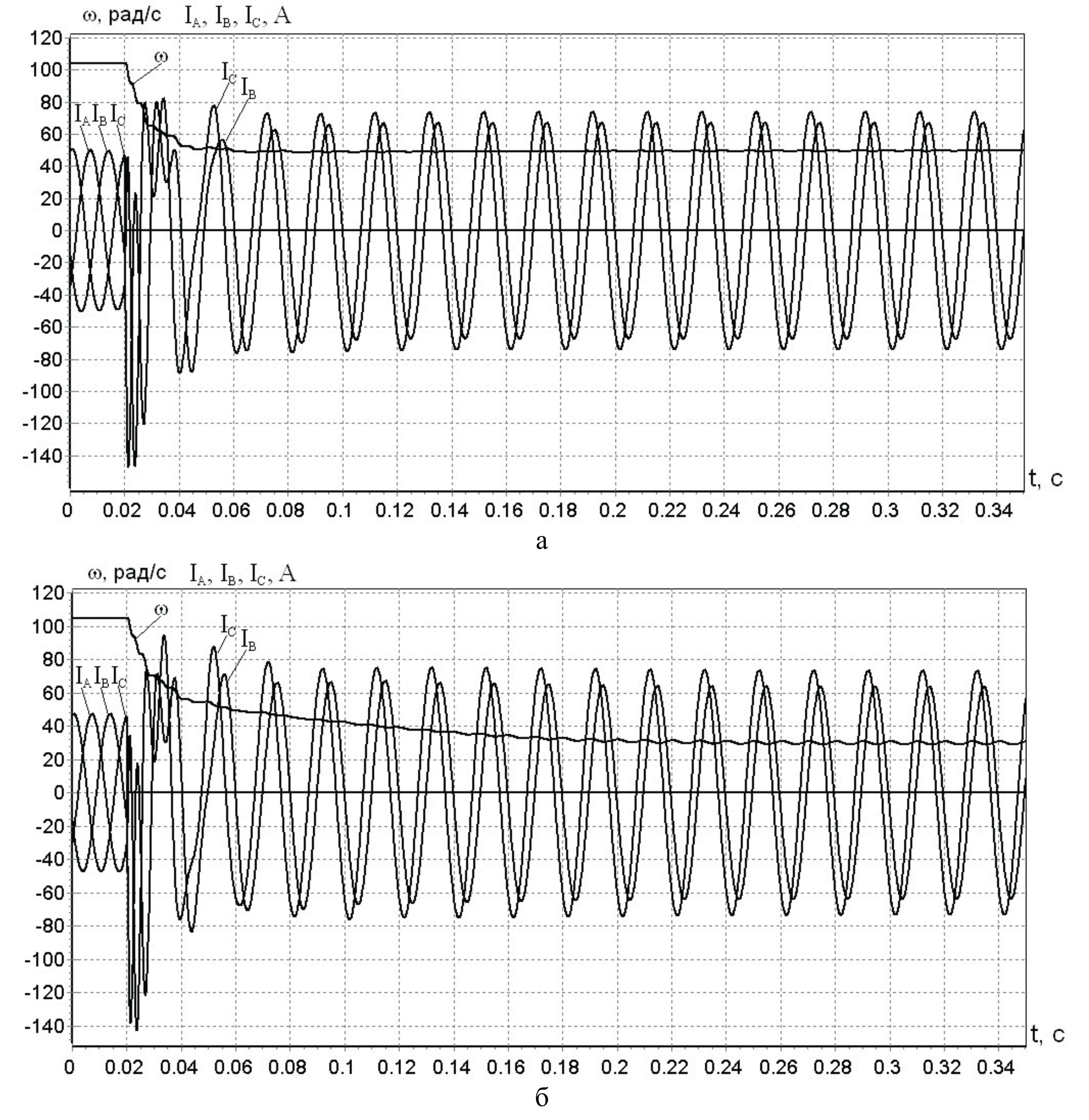


Рис. 4. *Временные диаграммы переходного процесса АД с активизированным алгоритмом восстановления при: а) нулевой и б) номинальной нагрузке*

тельно трехфазного режима, а при номинальной нагрузке наблюдается падение частоты вращения до уровня 29 %. Пульсации частоты вращения при нулевой нагрузке не превышают 0,5 %, а при номинальной нагрузке – 3,3 %.

На рис. 5, *а*, приведены развернутые графики переходного процесса частоты вращения и фазных токов АД при переключении из трехфазного в аварийный двухфазный режим с активизированным алгоритмом восстановления под номинальной нагрузкой (развернутый процесс переключения, рис. 4, *а*). Рассмотрен случай для времени диагностики $T_д$=0 (время с момента возникновения аварийной ситуации до момента активизации алгоритма восстановления).

В соответствии с алгоритмом восстановления за время переходного процесса фазовый сдвиг токов статора изменяется с величины $2\pi/3$ до $\pi/3$. Длительность электромагнитного переходного процесса является временем переключения $T_п$, которое составило 15 мс или 4 электромагнитных постоянных времени АД.

Импульс неконтролируемого тока при переключении составил 302 % к уровню амплитуды тока до аварии и не превышает величины кратности пускового тока АД.

Затягивание времени переключения $T_п$ будет проявляться в низкочастотной области диапазона частоты вращения в виде повышенных пульсаций и ограничения диапазона регулирования.

На рис. 5, *б*, приведены развернутые графики переходного процесса частоты вращения и фазных токов АД при переключении из трехфазного в аварийный двухфазный режим с активизированным

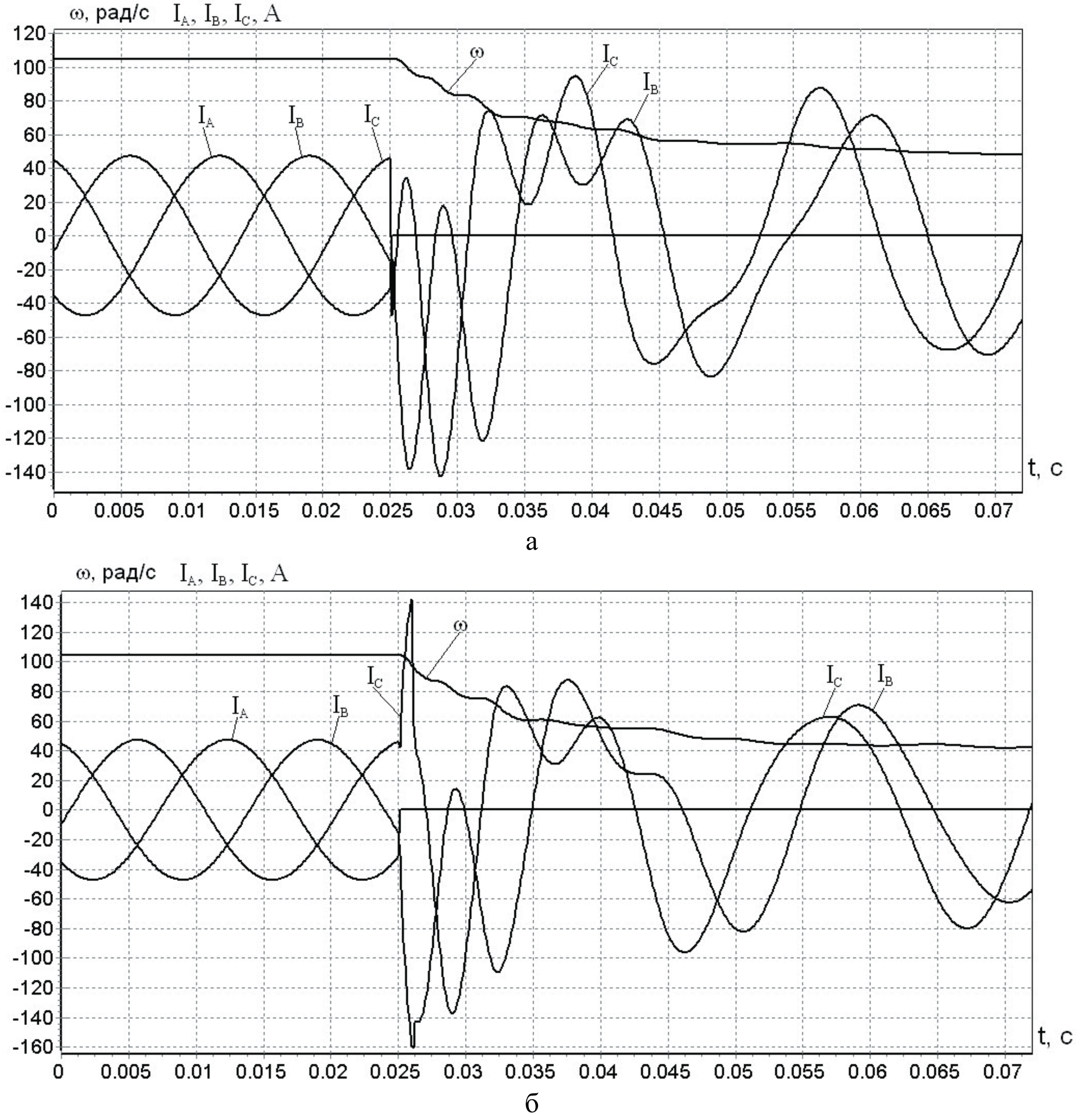


Рис. 5. *Развернутые временные диаграммы переходного процесса АД с активизированным алгоритмом восстановления при номинальной нагрузке и длительности времени диагностики Тд: а) 0 и б) 100 мкс*

алгоритмом восстановления под номинальной нагрузкой (развернутый процесс переключения, рис. 4, *б*) для случая $T_д$ =100 мкс (частота ШИМ 10 кГц). Рассмотрен худший случай, когда аварийная ситуация возникла в начале импульса ШИМ. В течение времени $T_д$ наблюдается неконтролируемая аварийная ситуация, вызванная замедлением реакции системы управления, что привило к росту амплитуды импульса знакопеременного тока до 340 %. Очевидно, что увеличенная скорость нарастания тока в фазах уменьшает время переключения $T_п$, что возможно при отсутствии дополнительных индуктивностей в цепях обмоток электрической машины.

Следует отметить, что в момент перехода из трех- в двухфазный аварийный режим амплитуда задания тока в регуляторах I_m не изменялась.

Выводы

1. Трехфазный частотно-регулируемых АД в аварийном двухфазном режиме при активизации алгоритма восстановления позволяет обеспечить повышение живучести с номинальной нагрузкой на валу и ограничением верхнего предела частоты вращения на уровне 29 % от уровня в трехфазном режиме.
2. Время переключения структуры электропривода при активизации алгоритма восстановления составляет не более четырех электромагнитных постоянных АД.
3. Броски тока в обеих фазах в момент переключения структуры электропривода существенно зависят от времени диагностики аварийной ситуации, которое должно быть минимизировано.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fu Jen-Ren, Lipo T.A. Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1994. – V. 30. – № 5. – P. 1267–1274.
2. Kastha Debaprasad, Bose Bimal K. Fault mode single-phase operation of a variable frequency induction motor drive and improvement of pulsating torque characteristics // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1994. – V. 41. – № 5. – С. 426–433.
3. Однокопылов Г.И. Микроконтроллерное управление вентильным двигателем в аварийном режиме: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2005. – 18 с.
4. Мехатроника / Пер. с япон. Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
5. Однокопылов Г.И. Датчик состояния преобразовательной ячейки // Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения: Матер. IV Междунар. научно-практ. конф. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2004. – С. 37–39.
6. Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством // Наука. Технологии. Инновации: Матер. Всеросс. научной конф. молодых ученых в 6-ти частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1.– С. 52–54.

УДК 621.313